

Estudos da Repetibilidade e Reprodutibilidade para dados contínuos

Parte II – Análise dos Dados

(<http://www.statistical.com.br/artigos.asp>)

Em 50 palavras ou menos

- A medição é peça fundamental no ciclo DMAIC. Há ferramentas para análise dos sistemas de medição para dados balanceados (usuais) ou desbalanceados
- A correta interpretação dos dados facilita a melhoria do sistema de medição ao mostrar quais são os fatores mais influentes.

Marcus Vinícius de C. de Castro

Introdução

No artigo anterior vimos como planejar e determinar a quantidade de repetições, analistas e amostras para fazer um estudo de repetibilidade e reprodutibilidade (RR) com confiabilidade. Neste artigo iremos tratar como analisar e interpretar os resultados e como realizar melhorias usando um enfoque técnico ou um enfoque estatístico. Para tal iremos mostrar um passo-a-passo utilizando o programa Minitab v.14.2.

Agradecemos a Tarcis Bastos e Maria Casa da empresa Rhodia Poliamida pela autorização na publicação dos exemplos aqui mostrados. Os arquivos com os dados dos exemplos podem ser baixados diretamente do site da M.I.Domenech: www.statistical.com.br.

Separamos a análise em três partes:

- Plano cruzado com várias amostras e vários analistas
- Plano cruzado com somente uma amostra e vários analistas
- Plano com dados incompletos (várias amostras e vários analistas)

Para fazer a análise do sistema de medição e descobrir qual é a precisão da análise, vamos seguir o diagrama abaixo, iniciando a análise com gráficos e depois utilizando o procedimento adequado ao planejamento feito (Figura 1).

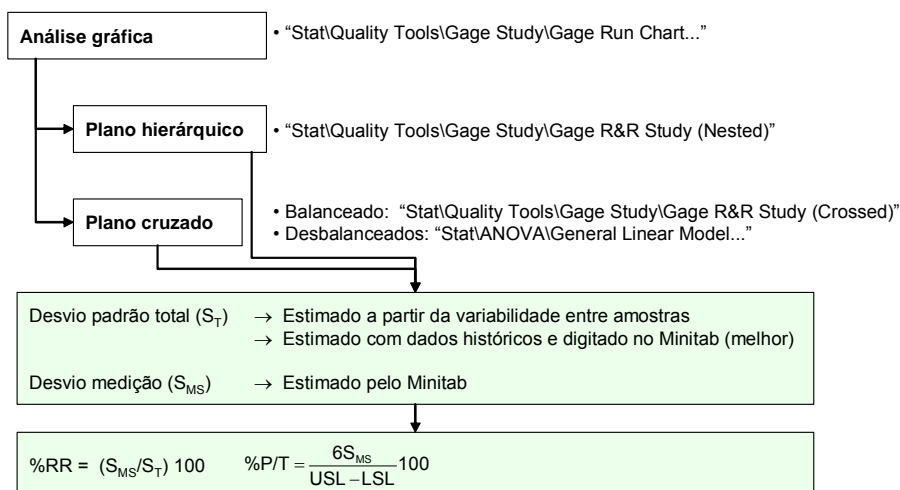


Figura 1 – Esquema de análise para os estudos de Repetibilidade e Reprodutibilidade

Plano Cruzado com várias amostras e analistas

O plano é cruzado quando todos os analistas fazem as medições usando as mesmas amostras. O exemplo está relacionado a uma análise de pH feita em um óleo aplicado à superfície de filamentos de poliamida para que estes tenham baixa estática durante a sua fabricação. O plano foi feito com 2 amostras, 3 analistas e 10 repetições. A especificação (tolerância) do pH para o produto é de 7,2 a 7,6, ou seja, uma faixa de 0,4 ($\pm 0,2$).

Para utilizarmos o Minitab é necessário que digitemos os dados em uma tabela indicando em colunas separadas o analista, a amostra e o resultado.

Pela Figura 1, o primeiro item a analisar é verificar se não há algum resultado muito discrepante dos demais, além de analisar graficamente a diferença entre os analistas. Isto é feito através dos gráficos **Gage Run Chart** (menu: "Stat \Quality Tools \Gage Study \Gage Run Chart ...").

Pela Figura 2 vemos grande diferença entre as amostras, mas pouca diferença entre os analistas (principalmente na amostra 2). O primeiro valor do analista A para amostra 1 ficou bem acima dos demais resultados. Podemos verificar se esta diferença foi alguma causa especial e decidirmos se iremos retirá-lo ou não da análise (no caso do exemplo, decidiu-se por manter este valor).

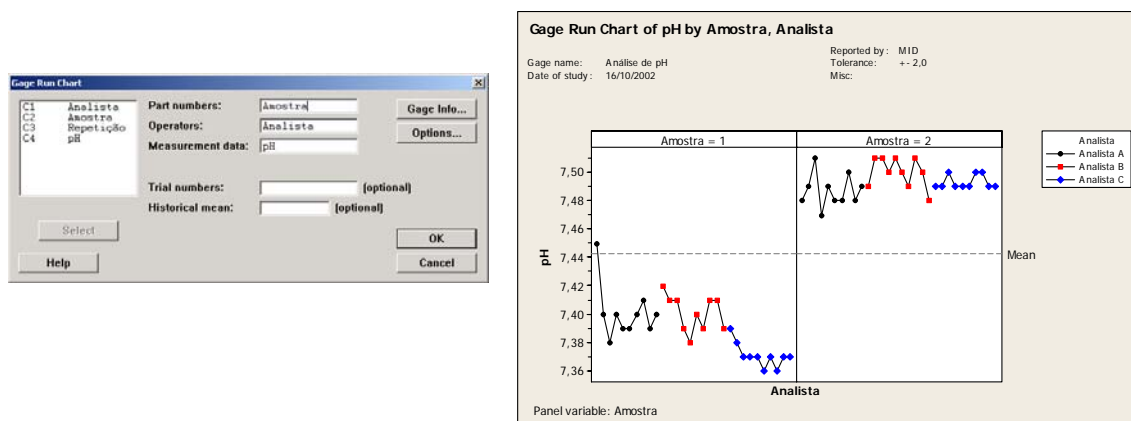


Figura 2 – Gráfico “run chart” com os dados de pH (procedimento “Stat\Quality Tools\Gage Run Chart...”)

Para fazermos o cálculo da precisão da análise, utilizamos “Stat \Quality Tools \Gage Study \Gage RR Study (Crossed)...”. No campo “Part numbers:” devemos informar a coluna que contém as amostras, no campo “Operators:” os analistas e no campo “Measurement data:” a medida que estamos estudando (Figura 3). No botão “Gage Info...” podem-se introduzir informações gerais do estudo. No botão “Options...” deve-se introduzir o número de desvios padrão utilizado para o cálculo de P/T (padrão é 6) e a tolerância do processo (Process Tolerance). Podemos colocar também o tamanho do desvio padrão total (histórico) para comparar a precisão com a variação do processo.

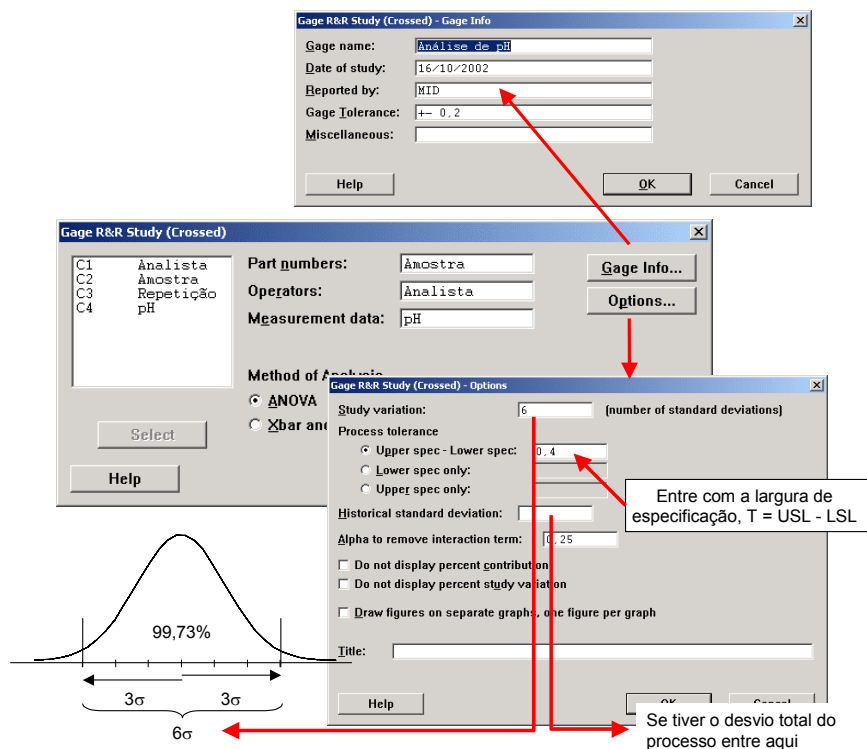


Figura 3 – Menu do comando “Stat\Quality Tools\Gage RR Study (Crossed)...”

Os resultados desta análise e os comentários do que significa cada um dos valores e gráficos, estão nas Figuras 4 e 5. Na coluna “VarComp” temos os valores das componentes da variância. É a partir destes valores que são feitos todos os outros cálculos.

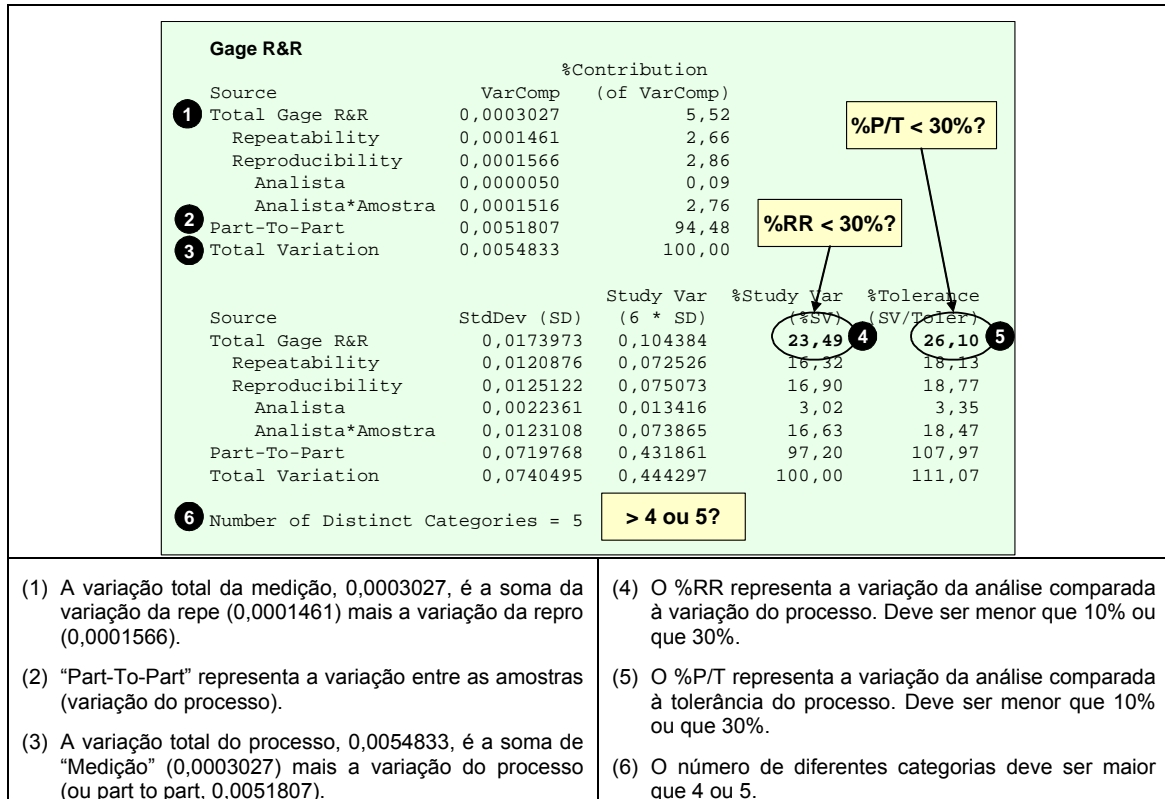
Os resultados principais são as medidas de %RR e %P/T, os quais são respectivamente a precisão da análise pela variação do processo e pela tolerância do processo. Para relembrar, os valores ideais de %RR e %P/T são:

- %RR e %P/T < 10% análise ok!
- 10% < %RR, %P/T < 30% método aceitável, mas em certos casos deve ser melhorado.
- %RR ou %P/T > 30% método inadequado!

No caso do plano cruzado com mais de uma amostra, o valor do desvio padrão da medição está na linha “Total Gage R&R”. O %RR ficou em 23,49% e o %P/T em 26,10, ambos os valores na faixa de 10% a 30%, indicando que a análise é aceitável. Para certas aplicações mais críticas poderia ser melhorado.

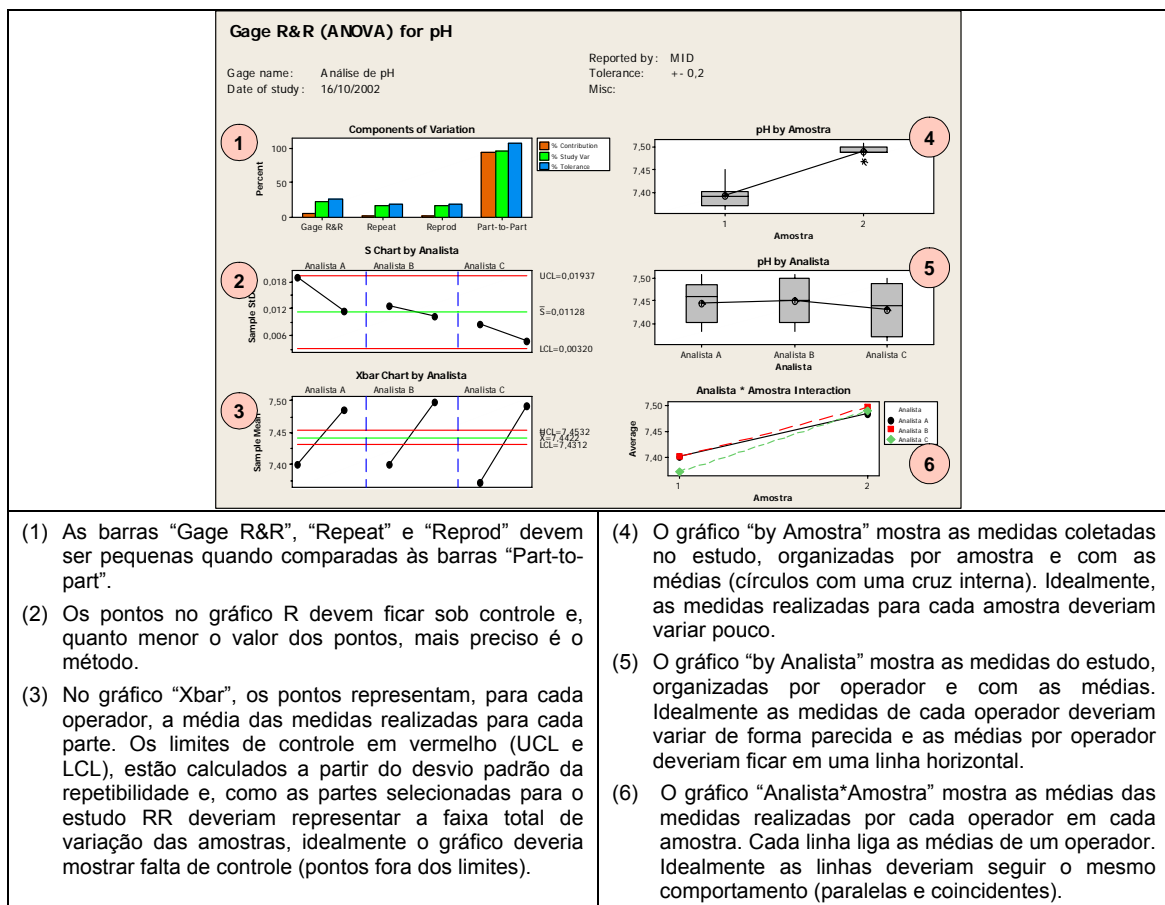
Comparando os valores das linhas “Repeatability” e “Reproducibility”, vemos que o peso das duas fontes na variação total são bem parecidos de forma que para diminuir a variação da análise seria necessário atacar as duas fontes.

A linha “Part-to-part”, para este caso, contém a variação entre as amostras, que representa a variação do processo somente se a variação entre as amostras abrange a faixa de variação normal do processo. Se as amostras não representam o processo, a métrica %RR não é válida.



- (1) A variação total da medição, 0,0003027, é a soma da variação da repe (0,0001461) mais a variação da repro (0,0001566).
- (2) "Part-To-Part" representa a variação entre as amostras (variação do processo).
- (3) A variação total do processo, 0,0054833, é a soma de "Medição" (0,0003027) mais a variação do processo (ou part to part, 0,0051807).
- (4) O %RR representa a variação da análise comparada à variação do processo. Deve ser menor que 10% ou que 30%.
- (5) O %P/T representa a variação da análise comparada à tolerância do processo. Deve ser menor que 10% ou que 30%.
- (6) O número de diferentes categorias deve ser maior que 4 ou 5.

Figura 4 – Resultados do estudo RR do Minitab "Stat\Quality Tools\ Gage Study\Gage RR Study (Crossed)..."



- (1) As barras "Gage R&R", "Repeat" e "Reprod" devem ser pequenas quando comparadas às barras "Part-to-part".
- (2) Os pontos no gráfico R devem ficar sob controle e, quanto menor o valor dos pontos, mais preciso é o método.
- (3) No gráfico "Xbar", os pontos representam, para cada operador, a média das medidas realizadas para cada parte. Os limites de controle em vermelho (UCL e LCL), estão calculados a partir do desvio padrão da repetibilidade e, como as partes selecionadas para o estudo RR deveriam representar a faixa total de variação das amostras, idealmente o gráfico deveria mostrar falta de controle (pontos fora dos limites).
- (4) O gráfico "by Amostra" mostra as medidas coletadas no estudo, organizadas por amostra e com as médias (círculos com uma cruz interna). Idealmente, as medidas realizadas para cada amostra deveriam variar pouco.
- (5) O gráfico "by Analista" mostra as medidas do estudo, organizadas por operador e com as médias. Idealmente as medidas de cada operador deveriam variar de forma parecida e as médias por operador deveriam ficar em uma linha horizontal.
- (6) O gráfico "Analista*Amostra" mostra as médias das medidas realizadas por cada operador em cada amostra. Cada linha liga as médias de um operador. Idealmente as linhas deveriam seguir o mesmo comportamento (paralelas e coincidentes).

Figura 5 - Gráficos do procedimento "Stat\Quality Tools\Gage RR Study (Crossed)..."

Plano Cruzado com uma amostra e vários analistas

No caso de termos somente uma amostra com várias medições de cada um dos analistas, utilizamos também o método de análise como exibido no plano cruzado com várias amostras, mas com algumas diferenças na interpretação, pois não teremos o fator “Part-to-part”.

Utilizaremos agora o exemplo da medição de uma variável em polímeros poliamida que está diretamente correlacionada com a qualidade final dos fios têxteis (chamaremos de “Variável A”). O plano foi feito com 3 analistas e 10 repetições sobre cada amostra. A especificação (tolerância) desta variável para é de ± 2 (uma faixa de 4 pontos). O desvio padrão histórico do processo é 1,27.

A análise se inicia com a verificação de valores extremos ou diferenças entre os analistas usando o gráfico Gage Run Chart (a interpretação deste gráfico é a mesma que a já apresentada anteriormente). Para fazer este gráfico com somente uma amostra, é necessário que se coloque uma coluna com a identificação da amostra, contendo um valor constante para todos os dados.

O cálculo da precisão é realizado em “Stat \Quality Tools \Gage Study \Gage RR Study (Crossed)...”. Neste caso, como temos somente uma amostra, se colocarmos no campo “Part numbers:” a coluna que conteria as amostras o Minitab apresenta uma mensagem de erro, falando que todas as amostras são as mesmas. Para poder fazer a análise, precisamos especificar no campo “Part numbers:” os analistas, e deixar em branco o campo “Operators:”. Com isto as informações entre as amostras (part-to-part) na verdade conterão as informações entre os analistas.

No botão “Options...” temos que preencher a tolerância e colocar também o valor do desvio padrão do processo (no caso de uma amostra é mais importante colocar esta informação, pois sem ela não conseguimos calcular o %RR).

Os resultados estão na Figura 6, com os comentários apropriados. Neste caso os valores de %P/T e %RR são os da linha “Total Variation”. No exemplo, o %P/T e %RR ficaram entre 10% e 30% (= 22,36% e 11,74% respectivamente) indicando que a medição é aceitável.

Comparando os valores das linhas “Repeatability” e “Part-to-Part”, estaremos comparando a repetibilidade com a variação entre os analistas (reprodutibilidade). Neste exemplo o fator que mais contribui para a variação da medição é a repetibilidade. A diferença entre os analistas contribui pouco na variação total da medição. Se fosse necessário melhorar ainda mais a precisão, deveríamos focar os esforços na diminuição do desvio padrão da repetibilidade. Nos gráficos da Figura 7, observa-se que o Analista C apresenta uma variabilidade maior que os outros e, portanto, é nele que devemos focar os esforços de melhoria (para se ter uma idéia, se fizermos a análise sem o Analista C o %P/T cai para 15,75%).

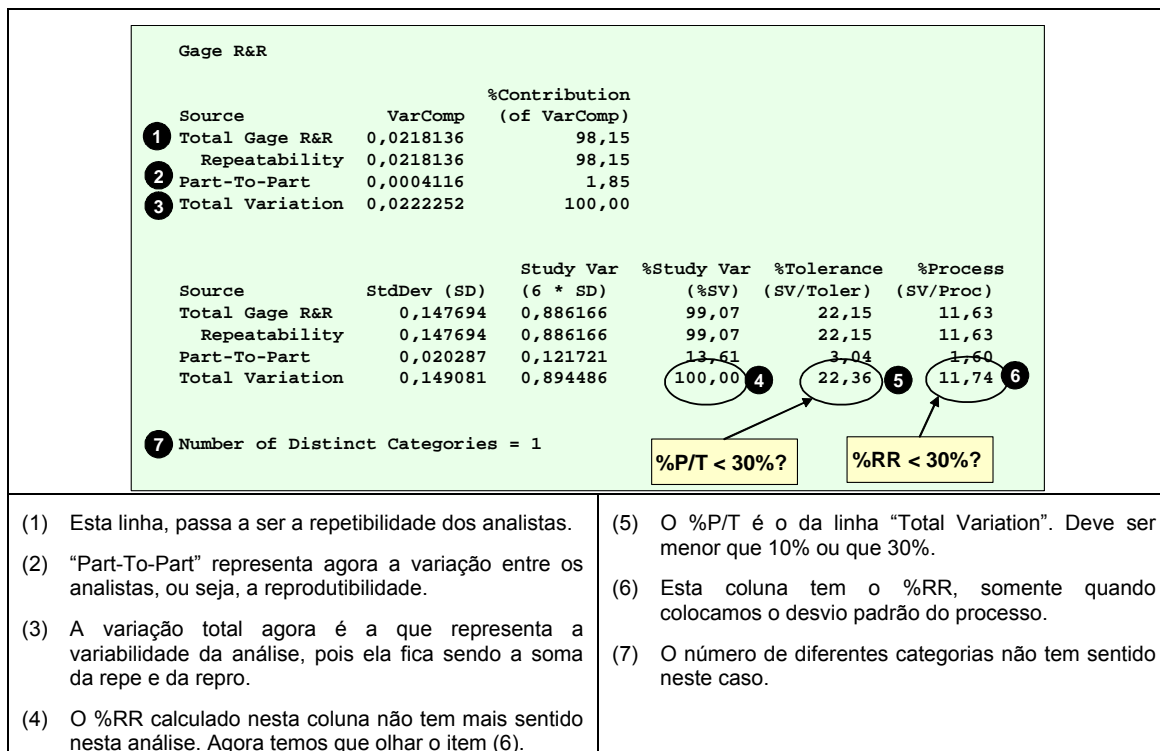


Figura 6 – Resultados do estudo RR para a Variável A
“Stat\Quality Tools\Gage Study\Gage RR Study (Crossed)...”

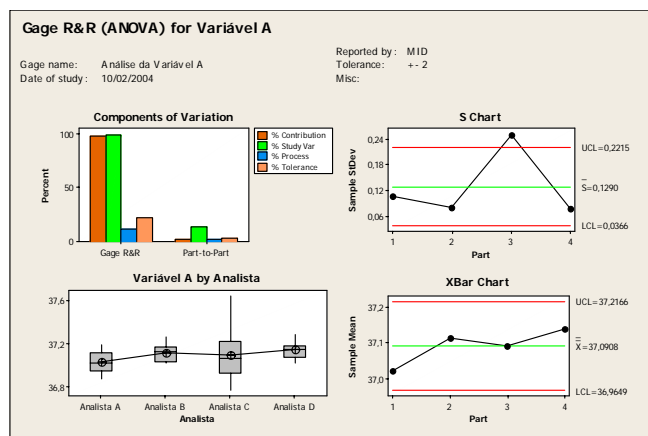


Figura 7 – Gráficos do estudo RR para a medida Variável A
“Stat\Quality Tools\Gage Study\Gage RR Study (Crossed)...”

Planos com dados incompletos: planos desbalanceados

Em alguns casos acontecem problemas durante a coleta e medição das amostras. Com isto o planejamento inicial falha e ficamos com um experimento desbalanceado por causa de dados faltantes. O procedimento Gage R&R do Minitab, somente permite fazer a análise se os dados estiverem balanceados. O que fazer nesta situação?

Vamos tomar como exemplo novamente o caso do pH. Vocês lembram que o primeiro resultado do Analista A estava muito acima dos demais resultados? Pois bem, suponha que esta diferença tenha sido gerada por uma causa especial e, em consequência, o resultado será desconsiderado. Ao eliminar este valor, não podemos mais fazer a análise pelo método do Gage R&R. Será necessário utilizar o procedimento “Stat \ANOVA \General Linear Model ...” (GLM).

Na análise pelo GLM devemos informar no campo “Response:” a medida que vamos analisar; no campo “Model:” temos que colocar “Amostra Analista Amostra*Analista” e no campo “Random Factors:” colocamos “Amostra e Analista” (Figura 8). Para obtermos as componentes de variância devemos clicar no botão “Results” e selecionar a opção “Display expected means squares and variance components”.

Na saída de resultados, inicialmente temos que verificar se na tabela da Análise de Variância (“Analysis of Variance for ...” – Figura 9a) o valor p da interação amostra*analista é maior que 0,250. Em caso afirmativo, deve-se retirar a interação da análise. Faz-se isto eliminando do campo “Model:” o termo “Amostra*Analista”. Se isto não for feito, poderá haver grande diferença entre o resultado do Gage RR e do GLM. Com a análise corrigida, os valores que nos interessam são as informações referentes às componentes da variância (Figura 9b) que se encontram na parte final da saída de resultados. Estes valores são os mesmos da coluna “VarComp” na saída do procedimento Gage R&R (Figura 4).

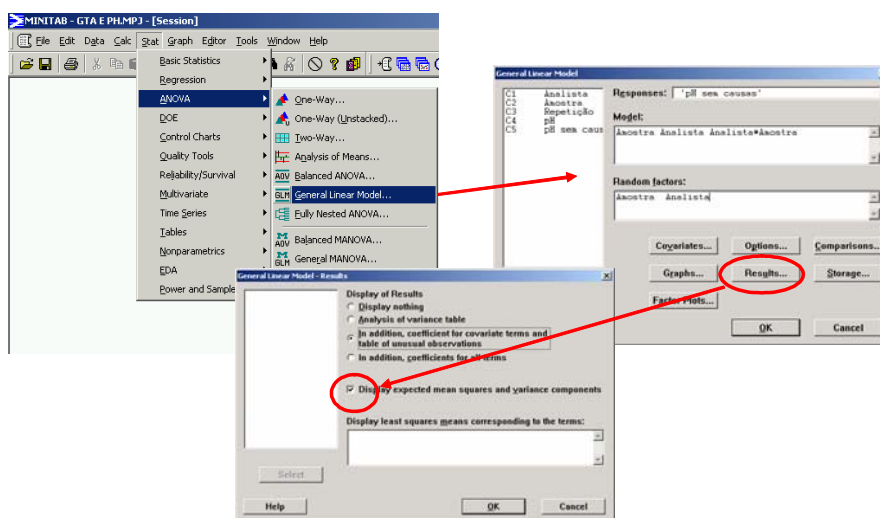


Figura 8 – “Comando Stat \ANOVA \General Linear Model...” para o cálculo das componentes de variância

a) Tabela da Análise de Variância	<p>Analysis of Variance for pH, using Adjusted SS for Tests</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Source</th> <th>DF</th> <th>Seq SS</th> <th>Adj SS</th> <th>Adj MS</th> <th>F</th> <th>P</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Amostra</td> <td>1</td> <td>0,157082</td> <td>0,157082</td> <td>0,157082</td> <td>94,53</td> <td>0,010</td> </tr> <tr> <td>Analista</td> <td>2</td> <td>0,003523</td> <td>0,003523</td> <td>0,001762</td> <td>1,06</td> <td>0,485</td> </tr> <tr> <td>Amostra*Analista</td> <td>2</td> <td>0,003323</td> <td>0,003323</td> <td>0,001662</td> <td>11,37</td> <td>0,000</td> </tr> <tr> <td>Error</td> <td>54</td> <td>0,007890</td> <td>0,007890</td> <td>0,000146</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>59</td> <td>0,171818</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">Se for > 0,250, refazer a análise sem a interação</p>	Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Amostra	1	0,157082	0,157082	0,157082	94,53	0,010	Analista	2	0,003523	0,003523	0,001762	1,06	0,485	Amostra*Analista	2	0,003323	0,003323	0,001662	11,37	0,000	Error	54	0,007890	0,007890	0,000146			Total	59	0,171818				
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P																																					
Amostra	1	0,157082	0,157082	0,157082	94,53	0,010																																					
Analista	2	0,003523	0,003523	0,001762	1,06	0,485																																					
Amostra*Analista	2	0,003323	0,003323	0,001662	11,37	0,000																																					
Error	54	0,007890	0,007890	0,000146																																							
Total	59	0,171818																																									
b) Componentes de Variância	<p>Variance Components, using Adjusted SS</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Source</th> <th>Estimated Value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Amostra</td> <td>0,00518 ← Part-to-part</td> </tr> <tr> <td>Analista</td> <td>0,00000</td> </tr> <tr> <td>Amostra*Analista</td> <td>0,00015</td> </tr> <tr> <td>Error</td> <td>0,00015 ← Repeatability</td> </tr> </tbody> </table>	Source	Estimated Value	Amostra	0,00518 ← Part-to-part	Analista	0,00000	Amostra*Analista	0,00015	Error	0,00015 ← Repeatability																																
Source	Estimated Value																																										
Amostra	0,00518 ← Part-to-part																																										
Analista	0,00000																																										
Amostra*Analista	0,00015																																										
Error	0,00015 ← Repeatability																																										

Figura 9 – Resultado do procedimento “Stat \ANOVA \General Linear Model...”

De posse destes dados, basta agora calcular os valores da tabela do Gage R&R. Está disponível no site da M.I.Domenech (www.statistical.com.br) uma planilha Excel já preparada para fazer estes cálculos, bastando informar os resultados das Componentes de Variância e a tolerância da análise (Figura 10). Caso algum valor seja negativo, entramos na planilha com o

valor 0. Preenchendo a planilha, vemos que o %RR ficou em 23,4 e o %P/T em 26,0, ambos os valores na faixa de 10% a 30%, indicando que a análise é aceitável.

Cálculo das incertezas a partir das Componentes de variâncias

Para calcular a incerteza da análise, digite nos quadrados amarelos as informações da Tolerância e Desvio Padrão do Processo e também os valores para a repe e repro vindos da Análise de Componentes Principais (GLM).

Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	0,00030	5,5
Repeatability	0,00015	2,7
Reproducibility	0,00015	2,7
Operador	0,00000	0,0
Operador*Amostra	0,00015	2,7
Part-To-Part	0,00518	94,5
Total Variation	0,00548	100,0

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%SV)	%Tolerance (SV/Toler)	%Process (SV/Proc)
Total Gage R&R	0,017321	0,103923	23,4	26,0	—
Repeatability	0,012247	0,073485	16,5	18,4	—
Reproducibility	0,012247	0,073485	16,5	18,4	—
Operador	0,000000	0,000000	0,0	0,0	—
Operador*Amostra	0,012247	0,073485	16,5	18,4	—
Part-To-Part	0,071972	0,431833	97,2	108,0	—
Total Variation	0,074027	0,444162	100,0	111,0	—

Figura 10 – Cálculo de %P/T e %RR com a planilha Excel

Melhoria do Sistema de Medição

Se o %RR ou %P/T for maior que 30% é imperativo realizar melhorias nos sistemas de medição. Em certos casos pode ser necessário realizar melhorias quando estas métricas forem maiores que 10%.

As melhorias usualmente consistem na calibração dos aparelhos, treinamento dos analistas, mudanças nos métodos de análise, etc. A análise detalhada dos resultados do Gage R&R permite um melhor planejamento da melhoria, seja em relação à reprodutibilidade (diferença entre os analistas), seja na repetibilidade. Para esta priorização utilizamos tanto os resultados gráficos quanto os numéricos, identificando onde estão as maiores variações. A esta forma de melhoria chamamos de **melhoria técnica**.

Há uma outra forma de fazer com que os índices %RR e %P/T fiquem abaixo de 10% ou de 30%. É a **melhoria estatística**, que se baseia na emissão do resultado da análise como uma média de várias repetições da medição. Da teoria estatística (distribuição da média amostral) temos que o desvio padrão de uma média é inversamente proporcional à raiz quadrada do tamanho da amostra utilizada para calcular esta média:

$$\sigma_{Média} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Como exemplo, se o %P/T de uma análise é de 40% (desvio padrão da análise igual a σ_{SM}), e passa-se a repetir a medição por 4 vezes e tomar como resultado da análise a média destes 4 valores, o desvio da medição e o %P/T, teoricamente caem pela metade, ficando em 20%:

$$\sigma_{Média} = \frac{\sigma_{SM}}{\sqrt{n}} = \frac{\sigma_{SM}}{\sqrt{4}} = \frac{\sigma_{SM}}{2}$$

$$\%P/T_{Média} = \frac{6 \cdot \sigma_{Média}}{Tolerância} = \frac{6 \cdot \sigma_{SM}}{2 \cdot Tolerância} = \frac{\%P/T}{2}$$

Conclusões:

O artigo focou a análise e interpretação dos planos cruzados. Mostramos como calcular e interpretar os resultados, destacando as diferenças entre um plano com várias amostras e um plano com uma amostra. Detalhamos também o caso de um plano desbalanceado para o qual temos que utilizar o procedimento General Linear Model (GLM) do Minitab. A análise e interpretação dos resultados para os planos hierárquicos são muito semelhantes.

Para melhorar um sistema de medição, sempre é recomendável escolher o caminho da melhoria técnica, mas quando chegamos ao limite da técnica ou quando o tempo para fazer esta melhoria não está de acordo com as nossas necessidades ou possibilidades, podemos utilizar a melhoria estatística e passar a emitir os resultados da medição como média de várias repetições.

Marcus Vinicius do C. de Castro é consultor da M. I. Domenech, empresa de métodos avançados e soluções Lean Seis Sigma. Estatístico e Mestrando em Gestão da Qualidade (USP). Trabalhou durante 10 anos na área de melhoria de processos. Atuou como Master Black Belt da Rhodia. Se tiver comentários sobre o artigo escreva a mi.domenech@statistical.com.br.